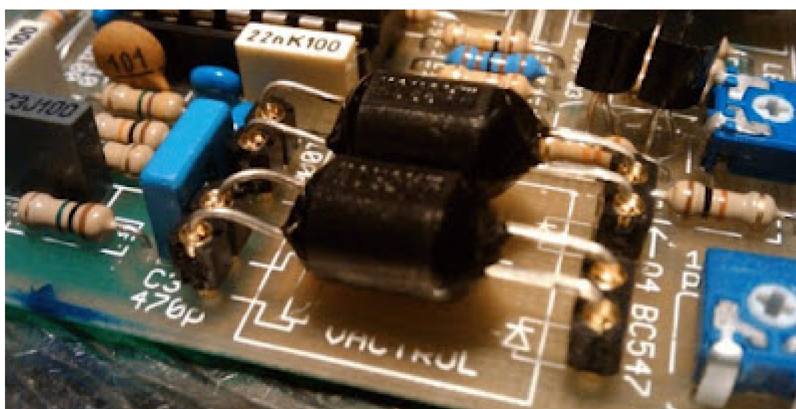
Vactrol's

Een vactrol bestaat uit een LED en een lichtgevoelige weerstand in een lichtdichte behuizing. Ze worden nu gedumpt en dat geeft u de kans deze vrij onbekende, maar interessante onderdelen goedkoop in huis te halen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 20-07-2018

Resistieve optische isolator

De vactrol
Vactrol was een handelsnaam van Vactec, die in de zestiger jaren van de vorige eeuw deze onderdelen introduceerde. Deze resistieve optische koppelaars werden zó populair in voornamelijk muziekelektronica kringen dat de eigennaam Vactrol een soortnaam is geworden.
Een vactrol is een combinatie van een lichtafhankelijke weerstand (LDR) en een lichtbron. Beide elementen zijn ondergebracht in een gemeenschappelijke volledig lichtdichte behuizing met vier aansluitdraadjes. In het verleden werden kleine gloei- of neonlampjes gebruikt als lichtbron. In de moderne uitvoeringen worden uiteraard lichtgevende dioden (LED's) toegepast. De verandering in helderheid is aanzienlijk sneller bij een LED dan bij een gloeilamp waarvan de gloeidraad uiteraard zeer traag reageert.



Een voorbeeld van twee vactrol's op een audio-print.
(© patchpierre.blogspot.com)

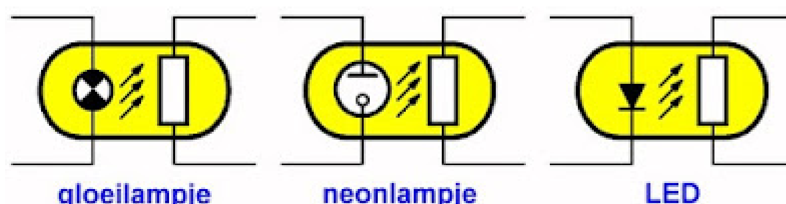
De werking van de vactrol
Het verhogen van de helderheid van de LED vermindert de weerstand van de LDR. Dit verschijnsel kunt u toepassen bij een heleboel schakelingen waar het er op aankomt een weerstand in waarde te laten veranderen onder invloed van een spanning. Vooral in de muziekelektronica werd en wordt deze eigenschap zeer op prijs gesteld in VFO's, VCA's, LFO's, tremolo's, vibrato's, spanningsgestuurde fasers, trigger-vertragingen, oscillatoren, compressoren en envelop-generatoren. In iedere gitaarversterker zitten wel een paar vactrol's die zorgen voor de effecten die de gitarist met zijn handeltjes en voetpedalen in zijn sound kan aanbrengen. De meeste tremolo- en vibrato-sounds worden met vactrol's gemaakt.

De voordelen van vactrol's
Het grote voordeel van vactrol's ten opzichte van andere spanningsgestuurde verzwakkers of

versterkers is dat ze zich gedragen als een normale ohmse weerstand. Bovendien kunt u de weerstand van de LDR in een vactrol over een zeer groot bereik variëren zonder vervorming in het te verwerken signaal te veroorzaken. Dit is de reden waarom op vactrol's gebaseerde muziekschakelingen meestal subjectief als zeer zacht worden waargenomen.
Een tweede voordeel is dat het relatief eenvoudig is schakelingen met vactrol's te ontwerpen. Wij komen daar later in dit artikel op terug.
Een derde voordeel is de volledige galvanische scheiding tussen de stuurspanning of -stroom en de te beïnvloeden weerstand. Ook dit is een eigenschap die bij het ontwerpen van gevoelige audioschakelingen zeer op prijs wordt gesteld.

De nadelen van vactrol's
Groot nadeel is de niet exact gedefinieerde karakteristiek van een vactrol. Dat heeft alles te maken met het feit dat de toleranties op de specificaties van zowel LED's als LDR's vrij groot zijn. Iedere vactrol zal zich dus zich een beetje anders gedragen, waardoor serieproductie een probleem is. Voor u, als hobbyist, maakt dat natuurlijk niets uit.
Een tweede nadeel is dat een LDR niet onmiddellijk reageert op verandering in helderheid, maar pas na een bepaalde vertragingstijd die op zijn beurt afhangt van de verlichtingssterkte.
Een derde nadeel is het extreem niet-lineaire verband tussen de aan de LED aangeboden stroom en de weerstand van de LDR. Wij komen daar later, bij het bespreken van de specificaties, op terug.

Het symbool van een vactrol
Het symbool van een vactrol is getekend in onderstaande figuur. U ziet drie versies, die te maken hebben met de lichtbron die in de vactrol aanwezig is. Van links naar rechts: een gloeilampje, een neonlampje en een LED.



De drie symbolen van een vactrol. (© 2018 Jos Verstraten)

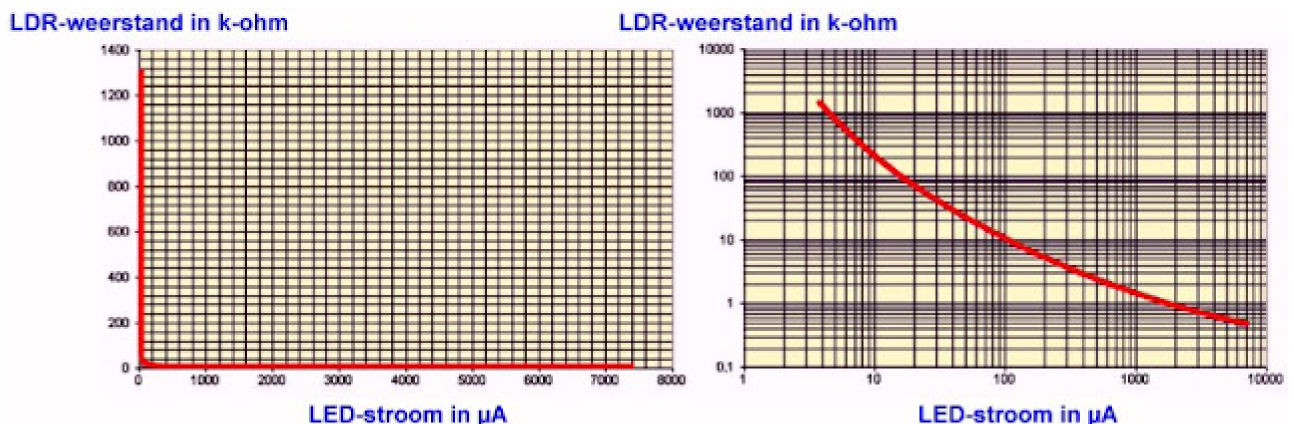
Een korte geschiedenis van de vactrol
Het eerste commerciële gebruik van een vactrol staat op naam van Teletronix, die een dergelijk component in de zestiger jaren gebruikte in zijn audiocompressor LA-2. De bekende gitaarfabrikanten Gibson en Fender namen in de zeventiger jaren deze technologie op grote schaal over. Toen Vactec in het jaar 2012 stopte met de productie van deze onderdelen, werd deze overgenomen door PerkinElmer Optoelectronics. Als u nu via de bekende postorderbedrijven een vactrol bestelt, dan is dat waarschijnlijk een exemplaar dat door deze Amerikaanse firma is gemaakt.
Naast PerkinElmer is er een klein aantal fabrikanten die soortgelijke vactrol's op de markt brengt of heeft gebracht. Wij noemen Advanced Photonix, Silonex, Xvive en Luna Optoelectronics. Vooral Xvive heeft een hele reeks vactrol's ontwikkeld met als onderscheidende eigenschap hun donkerweerstand die van 10 MΩ tot 400 MΩ varieert.
Zoals reeds geschreven in de inleiding heeft de Europese Unie in 2010 het gebruik van cadmiumsulfide in elektronische componenten verboden. Dat besluit tekende het Europese doodvonnis voor de handige en eenvoudig te gebruiken onderdelen die LDR's worden genoemd. Er werd echter één uitzondering gemaakt, namelijk voor het gebruik van cadmiumsulfide in analoge optische koppelaars toegepast in professionele audio-apparatuur. Wél wordt van de industrie verwacht dat het gebruik van LDR's op basis van cadmiumsulfide zo snel als maar mogelijk is wordt afgebouwd. Als datum voor dit proces werd door de EU 2013 voorgesteld.
Op dit moment verkopen diverse Europese onderdelenleveranciers nog steeds vactrol's van bijvoorbeeld Advanced Photonix, dus met de naleving van het verbod valt het in de praktijk wel mee (of tegen, 't is maar hoe u er tegenaan kijkt).

De eigenschappen van vactrol's

De LDR's
De spectrale gevoeligheid van de toegepaste cadmiumsulfide LDR's is het hoogst voor rood licht met een golflengte 640 nm en gaat tot ongeveer 900 nm. De donkerweerstand van dergelijke onderdelen is hoog, namelijk tientallen MΩ. Bij maximale belichting kan de weerstand dalen tot minder dan 1 kΩ. Het dynamisch regelbereik is dus zeer groot, soms wel meer dan 100 dB, hetgeen een groot voordeel is van vactrol's.

De LED's
Vanwege de spectrale gevoeligheid van de LDR's worden LED's toegepast die stralen in het rode golflengtebereik. Meestal wordt gebruik gemaakt van LED's op basis van AlGas (λ = 660 nm) of GaP (λ = 697 nm). De intensiteit van deze LED's is zo goed als proportioneel met de stroom die u door de LED stuurt. De LED's worden aan de LDR's gelijmd met een transparante epoxyhars of een organische polymeer. Dit medium zorg niet alleen voor de mechanische stabiliteit van de vactrol, maar dient ook als een soort van diffuse lens die het licht van de LED verspreid over het oppervlak van de LDR.

De transferkarakteristiek
De transferkarakteristiek geeft het verband tussen de stroom die u door de LED stuurt en de weerstand van de LDR. Wij schreven al dat dit verband extreem niet-lineair is. Als u zowel de LED-stroom als de LDR-weerstand op lineaire schalen uitzet ontstaat onderstaande linker grafiek. Hieruit blijkt dat de geringste toename van de stroom door de LED een zeer grote afname van de weerstand van de LDR tot gevolg heeft. Alleen als u beide grootheden op logaritmische schalen uitzet (rechter grafiek) ontstaat iets waarmee u in de praktijk kunt werken.
Uit de rechter grafiek kunt u afleiden dat de weerstand van een vactrol daalt van 200 kΩ tot 10 kΩ als u de stroom door de LED laat stijgen van 10 µA tot 100 µA. Er zijn echter ook vactrol's op de markt die een factor honderd ongevoeliger zijn en waar u dus stromen in het mA-bereik door de LED moet sturen.

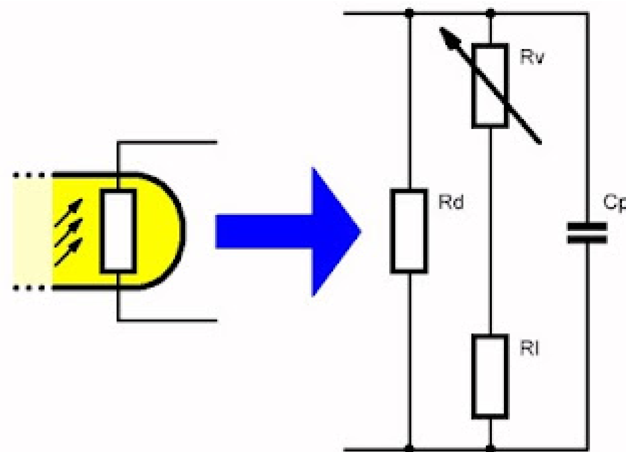


De transferkarakteristiek van een vactrol op lineaire en logaritmische schalen.
(© 2018 Jos Verstraten)

Het equivalent schema van de LDR
De LDR in een vactrol kunt u zich voorstellen als een serie/parallel-schakeling van drie weerstanden en een condensator.

- **Rd:**
  De donkerweerstand waarvan de waarde wordt bepaald door de eigenschappen van het materiaal en die ligt tussen een paar MΩ en een paar GΩ.
- **Rl:**
  De residuele weerstand die onafhankelijk is van de belichting en die een waarde heeft tussen 10 kΩ en 100 Ω.

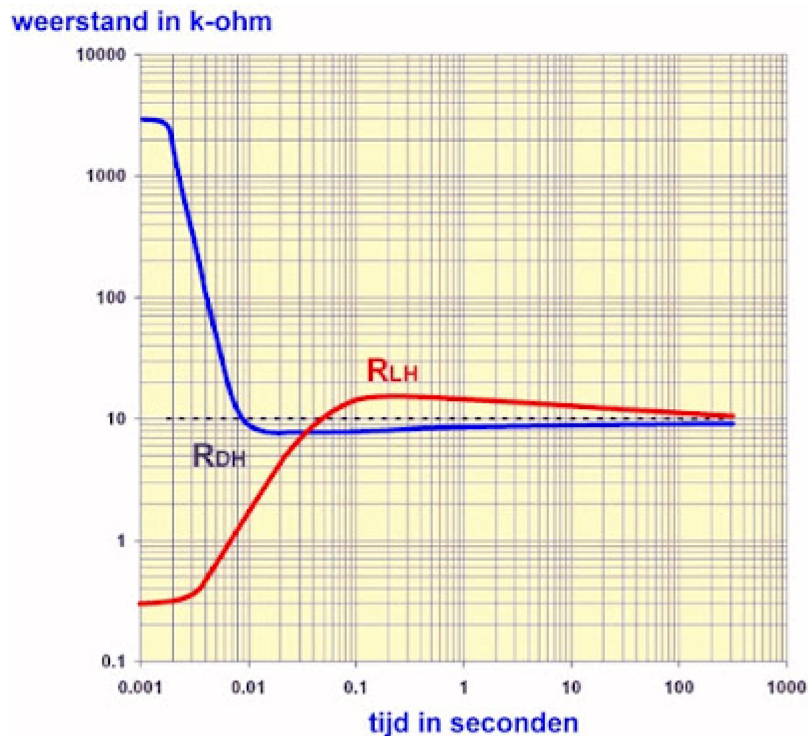
- **Rv:**
  De ideale fotoweerstand waarvan de weerstand omgekeerd evenredig is met de belichtingsgraad.
- **Cp:**
  de parallelle capaciteit, die bepaald wordt door de constructie van de LDR en de vactrol en een waarde heeft van ongeveer 10 pF.



Het equivalent schema van de LDR in de vactrol. (© 2018 Jos Verstraten)

Het geheugeneffect
De waarde van de weerstand van de LDR is niet alleen afhankelijk van de stroom door de LED, maar ook in een bepaalde mate van de weerstand die de LDR had voordat u de stroom door de LED veranderde. Dat noemt men het 'memory effect' van de LDR. Dit effect ebt langzaam weg in de loop der tijd, maar kan meer dan 24 uur zijn invloed uitoefenen.
Bij toepassingen met snelle lichtvariaties, zoals bij muziek-elektronica, zult u echter van dit effect weinig last hebben.

De traagheid van de LDR
Als u de stroom door de LED opeens laat wegvallen zal de LDR-weerstand van de vactrol niet even snel naar de nieuwe waarde stijgen. De LDR heeft een bepaalde traagheid die uiteraard verantwoordelijk is voor de breedte van de frequentieband waarin u dit onderdeel kunt inzetten. Hetzelfde verschijnsel doet zich in de omgekeerde richting voor. Ook als u de LED-stroom plotseling inschakelt zal de weerstand van de LDR niet traagheidsloos dalen naar de nieuwe waarde. Deze twee traagheden zijn samengevat in onderstaande grafiek. U ziet dat de traagheid van hoge weerstand naar lage weerstand (blauwe karakteristiek) kleiner is dan de traagheid van lage weerstand naar hoge weerstand (rode karakteristiek). Beide waarden liggen echter in het milliseconde gebied, waaruit u de conclusie kunt trekken dat een vactrol uiterst traag reageert op veranderingen in zijn ingangsstroom.

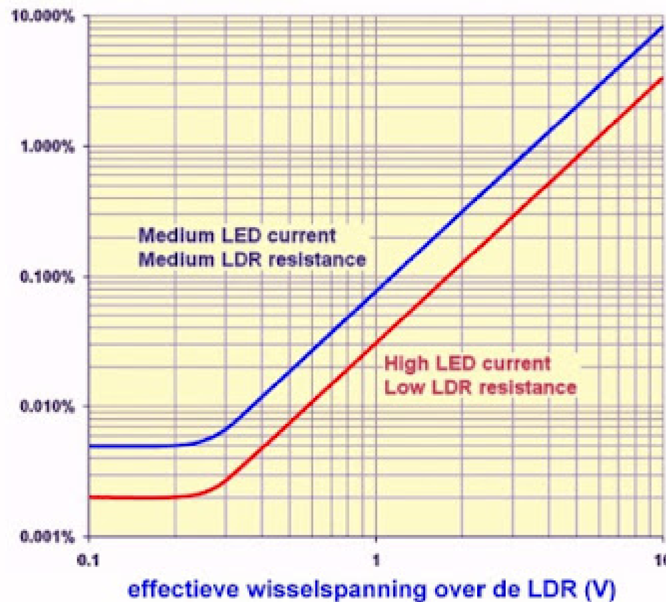


De traagheid van een vactrol grafisch voorgesteld.
(© East of Borschov, Wikimedia Commons)

Frequentiebereik
Uit de bespreking van de traagheid van een vactrol kunt u afleiden dat u zo'n onderdeel uitsluitend in laagfrequent toepassingen kunt gebruiken. Het frequentiebereik wordt gedefinieerd als de maximale frequentie van de LED-stroom die de LDR nog kan volgen. Een en ander is uiteraard ook afhankelijk van de amplitude van de stroomvariatie. Hoe groter deze amplitude, hoe trager de LDR zal volgen. Vandaar dat het frequentiebereik niet eenduidig met één waarde valt te definiëren. Afhankelijk van de omstandigheden moet u rekening houden met een maximaal frequentiebereik tot ongeveer 250 Hz. Dat geldt voor vactrol's die primair zijn voorzien van een LED. Vactrol's met een gloeilampje werken nog veel trager en hebben een frequentiebereik van maximaal 3 Hz.
Voor de genoemde toepassingen in audiovervormingsapparatuur is dat kleine frequentiebereik echter geen beperking.

Ruis
Net zoals bij ordinaire vaste weerstanden wordt de ruis over een LDR voornamelijk bepaald door de grootte van de thermische ruis. Deze ruis zit voornamelijk in de frequentiebanden boven 10 kHz en speelt een niet te verwaarlozen rol als er spanningen van meer dan 50 V over de LDR staan. Dat zal in de schakelingen waarin u vactrol's eventueel gaat toepassen nooit het geval zijn. Vactrol's zullen dus een verwaarloosbare ruisverhoging tot gevolg hebben. Alweer een belangrijke reden waarom u deze onderdelen met succes in audioschakelingen kunt toepassen.

Signaalvervorming
Signalen die door een vactrol lopen zullen minimaal worden vervormd. Als de signaalspanning over de LDR kleiner blijft dan 300 $mV_{effectief}$ en de weerstand van de LDR blijft lager dan 100 kΩ kunt u rekening houden met een extreem lage signaalvervorming van maximaal 0,01 %. Deze vrijwel onmeetbare vervorming zit voornamelijk in de tweede harmonische van de signaalfrequentie. Bij een signaalspanning van 1 $V_{effectief}$ over de LDR neemt de vervorming toe tot ongeveer 0,1 % en wordt deze voornamelijk bepaald door de derde harmonische van de signaalfrequentie.



De vervorming die een vactrol op een sinussignaal introduceert.
(© East of Borschov, Wikimedia Commons)

Degradatie
De specificaties van de LDR in een vactrol degraderen onomkeerbaar als u de spanning over de weerstand groter maakt dan de maximaal gespecificeerde waarde, zelfs als u dat maar heel even doet. Voor de meeste typen ligt de maximale spanning die u over de LDR mag zetten tussen 100 V en 200 V.
De eigenschappen van de LED blijven gedurende de volledige levensduur van de vactrol ongeveer ongewijzigd. Een typische LED heeft immers een levensduur van 100.000 uur. De donkerweerstand van een LDR gaat echter ieder jaar dat het onderdeel spanning voert met ongeveer 10% dalen.

De VTL5C1 van PerkinElmer Optoelectronics

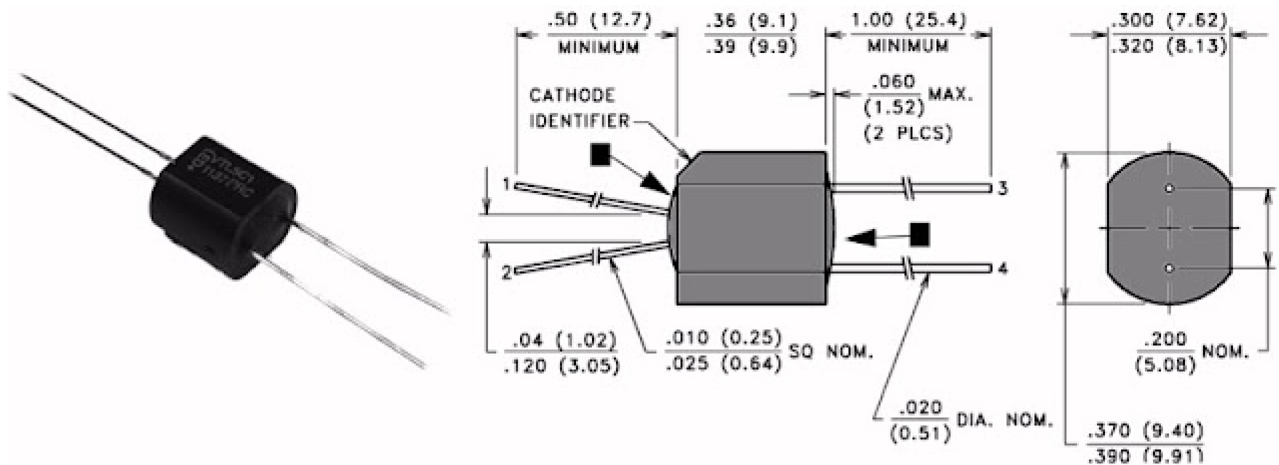
Leverbaarheid
Deze zeer populaire vactrol van PerkinElmer Optoelectronics wordt op sites als AliExpress, eBay en Amazon door tientallen aanbieders voor zeer uiteenlopende prijzen aangeboden, het loont dus om wat tijd te besteden aan het doorzoeken van het internet. Er zijn leveranciers die dit component voor $ 0.99 verkopen, maar wij zijn ook verkopers tegengekomen die er $ 5.00 voor vragen. Bovendien treft u ook na-apers aan die deze allerpopulairste vactrol onder dezelfde code aanbieden, zoals bijvoorbeeld Xvive.

Specificaties
De specificaties van deze vactrol zijn:

- **Weerstand bij 1 mA LED-stroom:** 20 kΩ typisch
- **Weerstand bij 10 mA LED-stroom:** 600 Ω typisch
- **Weerstand bij 40 mA LED-stroom:** 200 Ω typisch
- **Donkerweerstand:** 50 MΩ typisch
- **Dynamisch bereik**: 100 db typisch tussen 0 mA en 20 mA
- **Inschakeltijd:** 2,5 ms typisch
- **Uitschakeltijd:** 35 ms typisch
- **Isolatiespanning:** 2,5 kV typisch
- **IN/UIT capaciteit:** 0,5 pF typisch
- **Spanning over de LDR:** 100 V max.
- **LED-stroom:** 40 mA max.
- **LED-spanning bij 20 mA:** 1,65 V typisch

- **Capaciteit LDR:** 5,0 pF typisch
- **Temperatuursbereik:** -40 °C ~ 75 °C

Afmetingen
In onderstaande figuur zijn de afmetingen van dit onderdeel samengevat. De opdruk aan de primaire kant is '-LED+', aan de secundaire kant 'CELL'.



De afmetingen van de VTL5C1 en VTL5C2. (© PerkinElmer Optoelectronics)

De VTL5C2 van PerkinElmer Optoelectronics

Leverbaarheid
Deze vactrol van PerkinElmer Optoelectronics zult u niet zo vaak te koop zien staan en als hij ergens leverbaar is, dan is het voor een prijs die tien keer hoger is dan deze van de VTL5C1. Het uiterlijk en de afmetingen van beide typen zijn identiek.

Specificaties
De specificaties van deze vactrol zijn:
- **Weerstand bij 1 mA LED-stroom:** 5,5 kΩ typisch
- **Weerstand bij 10 mA LED-stroom:** 800 Ω typisch
- **Weerstand bij 40 mA LED-stroom:** 200 Ω typisch
- **Donkerweerstand:** 1 MΩ typisch
- **Dynamisch bereik:** 69 db typisch tussen 0 mA en 20 mA
- **Inschakeltijd:** 3,5 ms typisch
- **Uitschakeltijd:** 500 ms typisch
- **Isolatiespanning:** 2,5 kV typisch
- **IN/UIT capaciteit:** 0,5 pF typisch
- **Spanning over de LDR:** 100 V max.
- **LED-stroom:** 40 mA max.
- **LED-spanning bij 20 mA:** 1,65 V typisch
- **Capaciteit LDR:** 5,0 pF typisch
- **Temperatuursbereik:** -40 °C ~ 75 °C

Typen van Xvive

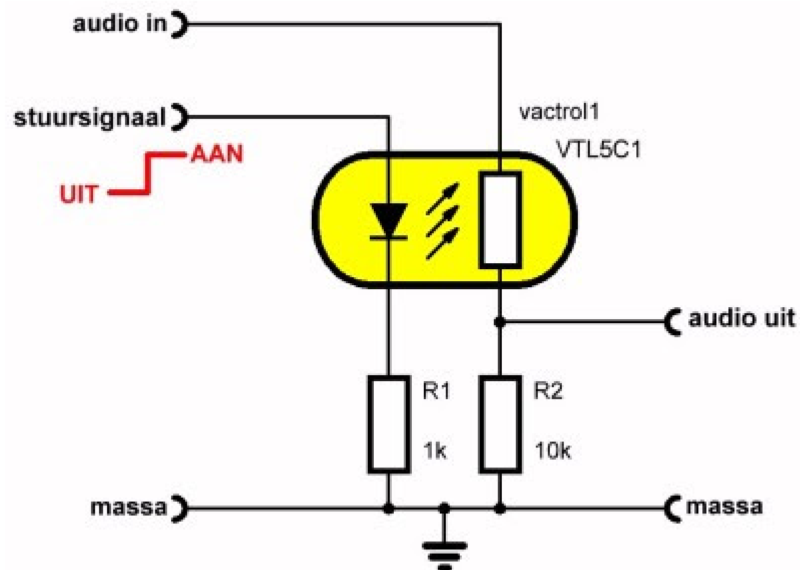
Een uitgebreide familie
Deze fabrikant heeft een hele reeks vactrol's ontwikkeld, waarvan de leverbaarheid echter ter discussie staat. Voor de volledigheid van dit artikel geven wij in onderstaande tabel een overzicht van deze familie met de voornaamste specificaties.

Part Number	On Resistance		Off Resistance @ 10 sec. min.	Dynamic Range	Cell Voltage	Response Time	
	Input Current	Dark Adapted typ.				Turn-on to 63% Final R_{ON} typ.	Turn-off (Decay) to 100 Ω max.
VTL5C1	1 mA 10 mA 40 mA	20 kΩ 600 Ω 200 Ω	50 MΩ	100 db	100 V	2.5 ms	35 ms
VTL5C2	1 mA 10 mA 40 mA	5.5 kΩ 800 Ω 200 Ω	1 MΩ	69 db	200 V	3.5 ms	500 ms
VTL5C2/2	5 mA 40 mA	2.5 kΩ 700 Ω	1 MΩ	65 db	50 V	7 ms	150 ms
VTL5C3	1 mA 10 mA 40 mA	30 kΩ 5 kΩ 1.5 kΩ	10 MΩ	75 db	250 V	2.5 ms	35 ms
VTL5C3/2	1 mA 40 mA	55 kΩ 2 kΩ	10 MΩ	71 db	100 V	3 ms	50 ms
VTL5C4	1 mA 10 mA 40 mA	1.2 kΩ 125 Ω 75 Ω	400 kΩ	72 db	50 V	6 ms	1.5 sec
VTL5C4/2	1 mA 10 mA	1.5 kΩ 150 Ω	400 kΩ	68 db	30 V	6 ms	1.5 sec
VTL5C6	1 mA 10 mA 40 mA	75 kΩ 10 kΩ 2 kΩ	100 MΩ	88 db	250 V	3.5 ms	50 ms (1 MΩ)
VTL5C7	0.4 mA 2 mA	5 kΩ 1.1 kΩ	1 MΩ	75 db	50 V	6 ms	1 sec. (100 kΩ)
VTL5C8	1 mA 4 mA 16 mA	4.8 kΩ 1.8 kΩ 1 kΩ	10 MΩ	80 db	500 V	4 ms	60 ms
VTL5C9	2 mA	630 Ω	50 MΩ	112 db	100 V	4 ms	50 ms
VTL5C10	1 mA	400 Ω	400 kΩ	75 db	50 V	1 ms	1.5 sec

De vactrol-familie van Xvive. (© Xvive)

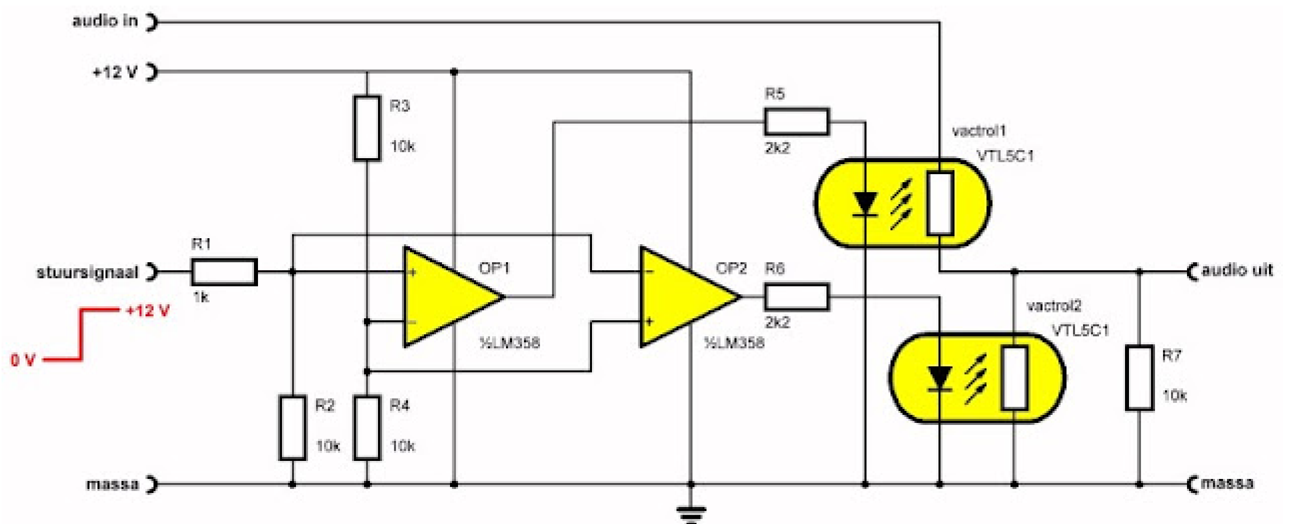
Toepassingen van vactrol's

Contactloos schakelen van audiosignalen (1)
Wij nemen aan dat het u wel duidelijk is dat vactrol's ideale onderdelen zijn om audiosignalen volledig contactloos in en uit te schakelen. In onderstaande figuur is het meest eenvoudige schema voorgesteld, waarbij u gebruik maakt van één vactrol die een zo hoog mogelijke donkerweerstand moet hebben. Als de stuurspanning 'L' is, dan is de LED donker en heeft de vactrol zijn maximale weerstand. Deze weerstand vormt een spanningsdeler met de weerstand R2 en de weerstandsverhouding is dusdanig dat vrijwel het volledig ingangssignaal over de LDR valt en vrijwel niets over de weerstand R2. Als u de ingang 'H' maakt gaat de LED branden en gaat de weerstand van de LDR naar zijn minimale waarde. Hierbij is de trage reactie van de vactrol zelfs een voordeel. Het audiosignaal verschijnt met een soort van 'soft-start' op de uitgang van de schakeling.



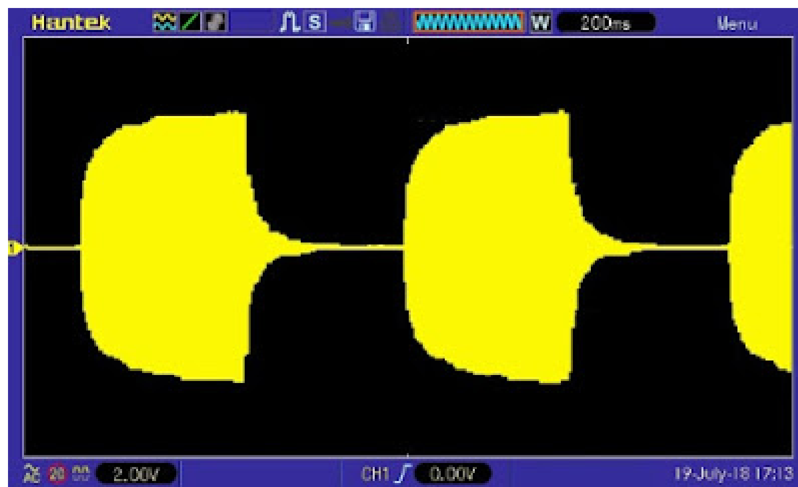
Het contactloos in- en uitschakelen van een audiosignaal. (© 2018 Jos Verstraten)

Contactloos schakelen van audiosignalen (2)
Een beter systeem voor het in- en uitschakelen van audiosignalen is voorgesteld in onderstaande figuur. Hierbij worden twee vactrol's toegepast die afwisselend in geleiding en sper worden gestuurd door een signaal van 0 V of +12 V. De twee op-amp's zijn geschakeld als comparatoren die de twee stuursignalen 0 V en +12 V vergelijken met een drempelspanning van +6 V. Die drempel wordt door de spanningsdeler R3-R4 afgeleid uit de voedingsspanning van +12 V.



Met twee vactrol's gaat het iets professioneler. (© 2018 Jos Verstraten)

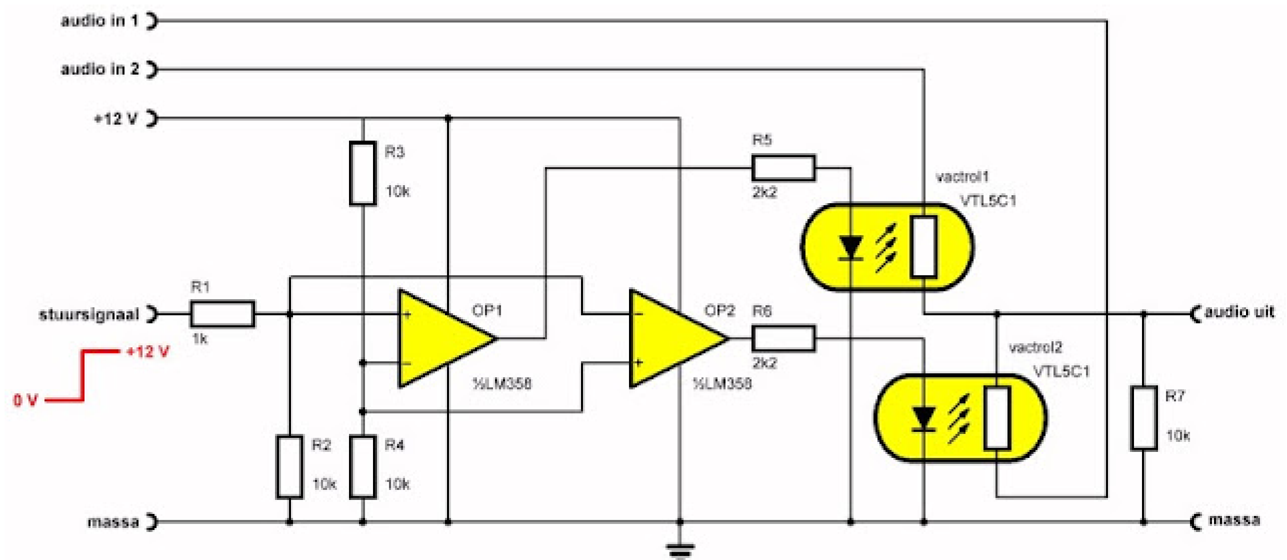
Uit onderstaand oscillogram blijkt hoe mooi symmetrisch deze schakeling werkt. Zowel bij het in- als bij het uitschakelen zal het uitgangssignaal in een tijd van ongeveer 100 ms in- en uitfaden van maximaal naar nul en vice versa. Om een en ander goed zichtbaar te maken op het scherm van de scoop werd de stuuringang gestuurd met een blokgolf met een frequentie van 10 Hz en werd de ingang gevoed door een sinus van 1 kHz.



Het uitgangssignaal van de vorige schakeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Contactloze omschakelaar van audiosignalen

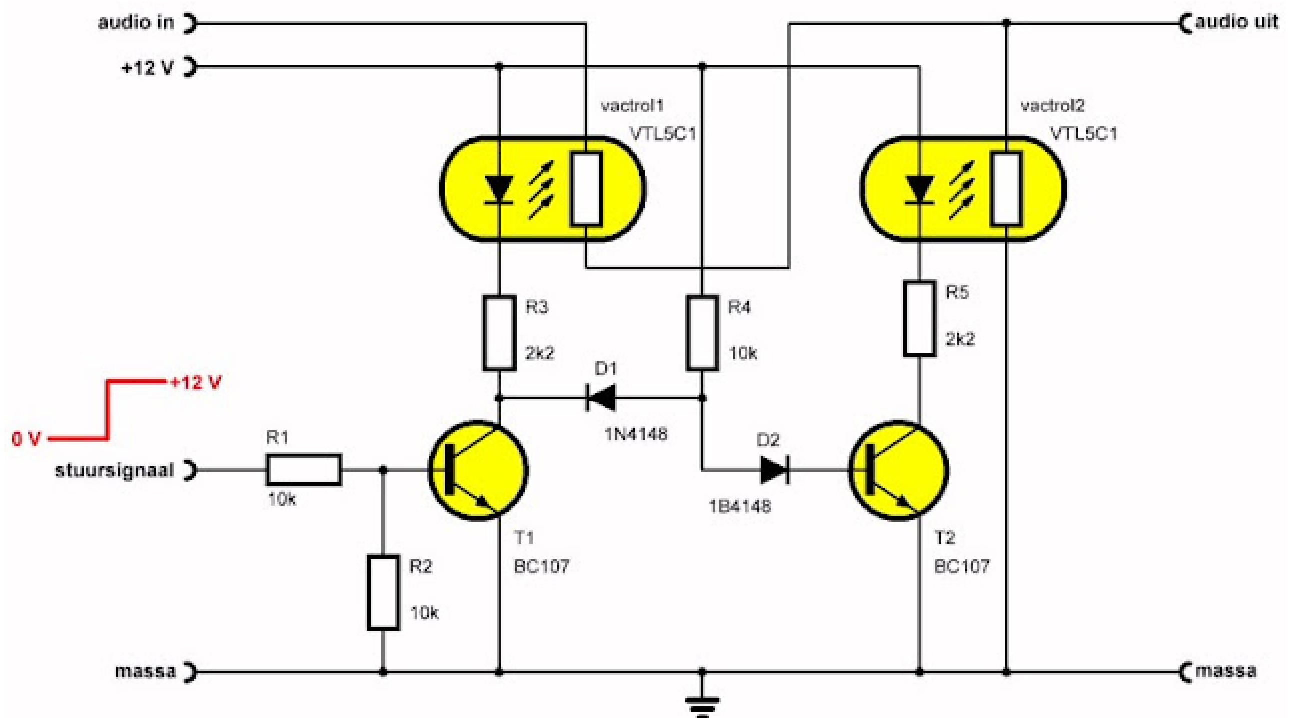
De volgende toepassing waar u handig gebruik kunt maken van vactrol's is een omschakelaar waarbij u met behulp van een stuursignaal twee ingangssignalen schakelt naar één uitgang. Deze toepassing vereist een voor de hand liggende aanpassing van het vorige schema. Het resultaat is voorgesteld in onderstaande figuur. Door het ofwel belichten van de LDR in vactrol1 ofwel de LDR in vactrol2 zal ofwel signaal 1 ofwel signaal 2 naar de uitgang worden doorgekoppeld. De grote schakeltijden van de vactrol's zorgen voor een zeer natuurlijke overgang van het ene naar het andere signaal.



Het omschakelen van twee audiosignalen naar één uitgang. (© 2018 Jos Verstraten)

Een muting-schakeling met transistoren

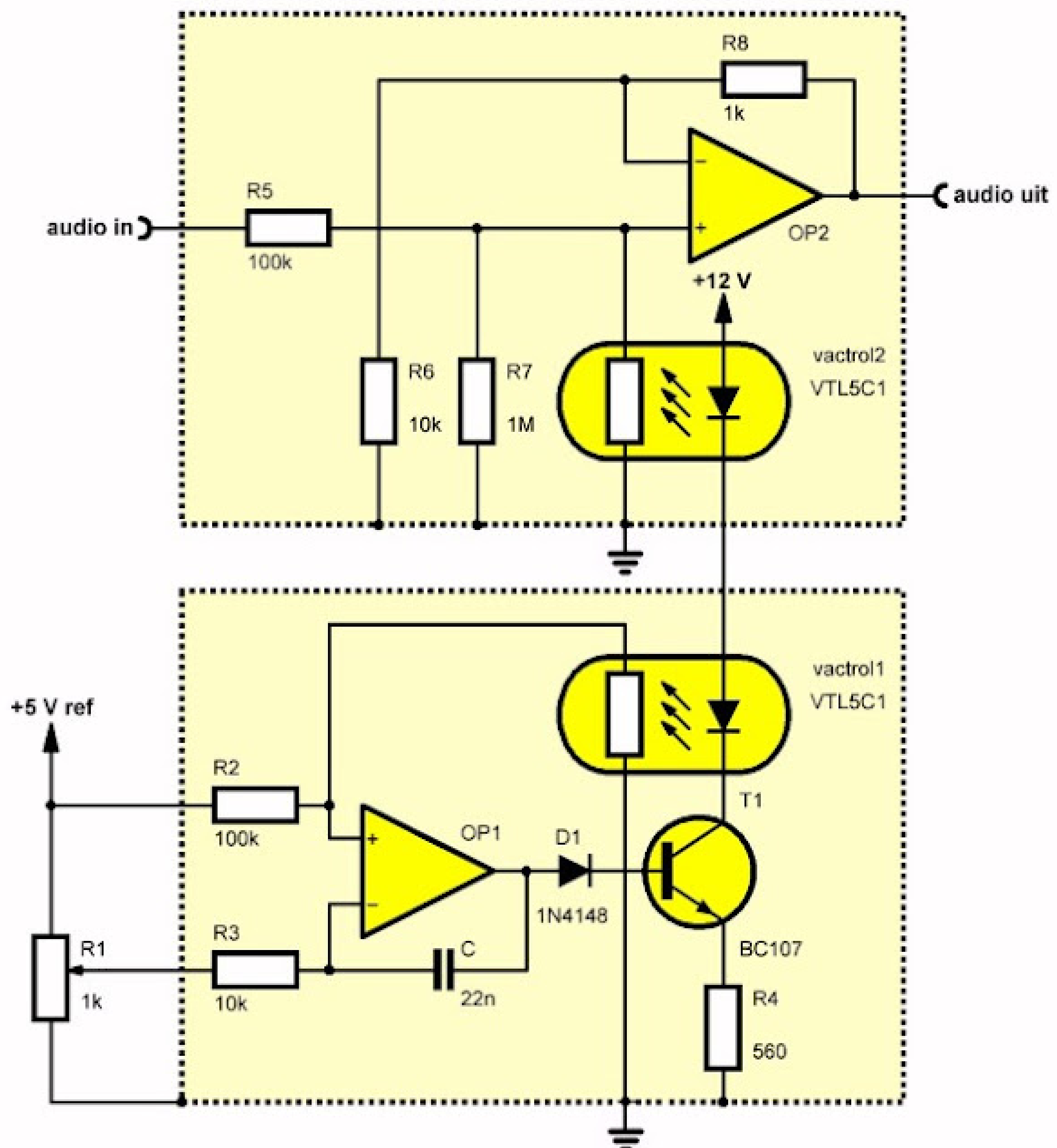
Vindt u het gebruik van twee op-amp's voor het in- en uitschakelen van een audiosignaal wat teveel van het goede? Volgens onderstaand schema kunt u hetzelfde resultaat verkrijgen met twee transistoren. Als het stuursignaal 0 V is spert transistor T1. Vactrol1 heeft een maximale weerstand. Transistor T2 krijgt basisstroom via R4 en D2, geleidt en stuurt de LED in vactrol2. Deze heeft minimale weerstand. Het 'audio in'-signaal wordt volledig verzwakt, de uitgang voert geen signaal.
Als het stuursignaal +12 V is draaien de rollen om. T1 geleidt en T2 spert, met als gevolg dat vactrol1 een minimale en vactrol 2 een maximale weerstand heeft. Het ingangssignaal verschijnt onverzwakt op de uitgang.



Een audio muting-schakeling met transistoren en vactrol's. (© 2018 Jos Verstraten)

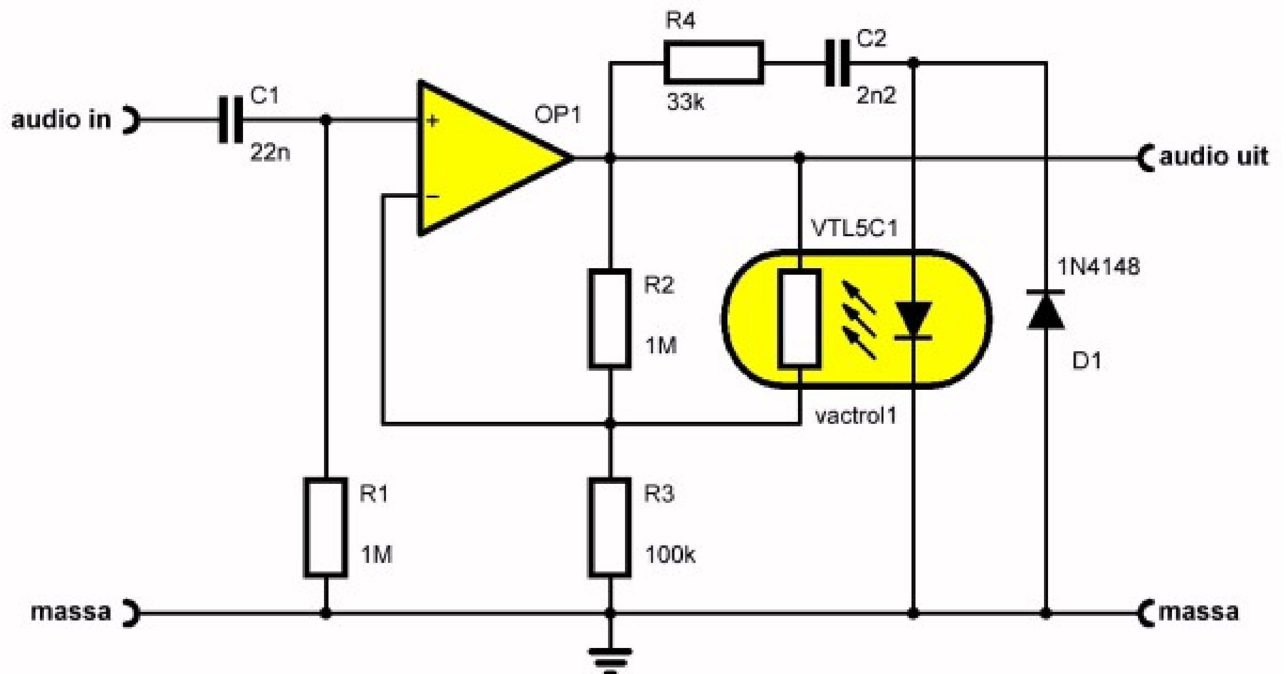
Een spanningsgestuurde verzwakker

In onderstaande figuur wordt een spanningsgestuurde verzwakker voorgesteld waarmee u een audiosignaal door middel van een stuurspanning tussen 0 V en +5 V over een groot dynamisch bereik kunt verzwakken. Vactrol2 zit in de potentiometerschakeling R5-R7 en regelt het signaalniveau dat aan OP2 wordt aangeboden. Potentiometer R1 is de voorstelling van het stuursignaal tussen 0 V en +5 V. Deze +5 V moet een uitstekend gestabiliseerde en zeer stabiele referentiespanning zijn. OP1 regelt de stroom die door de LED's van de twee vactrol's wordt gestuurd. Om de schakeling zo stabiel mogelijk te laten werken is het noodzakelijk dat beide vactrol's identieke specificaties hebben.



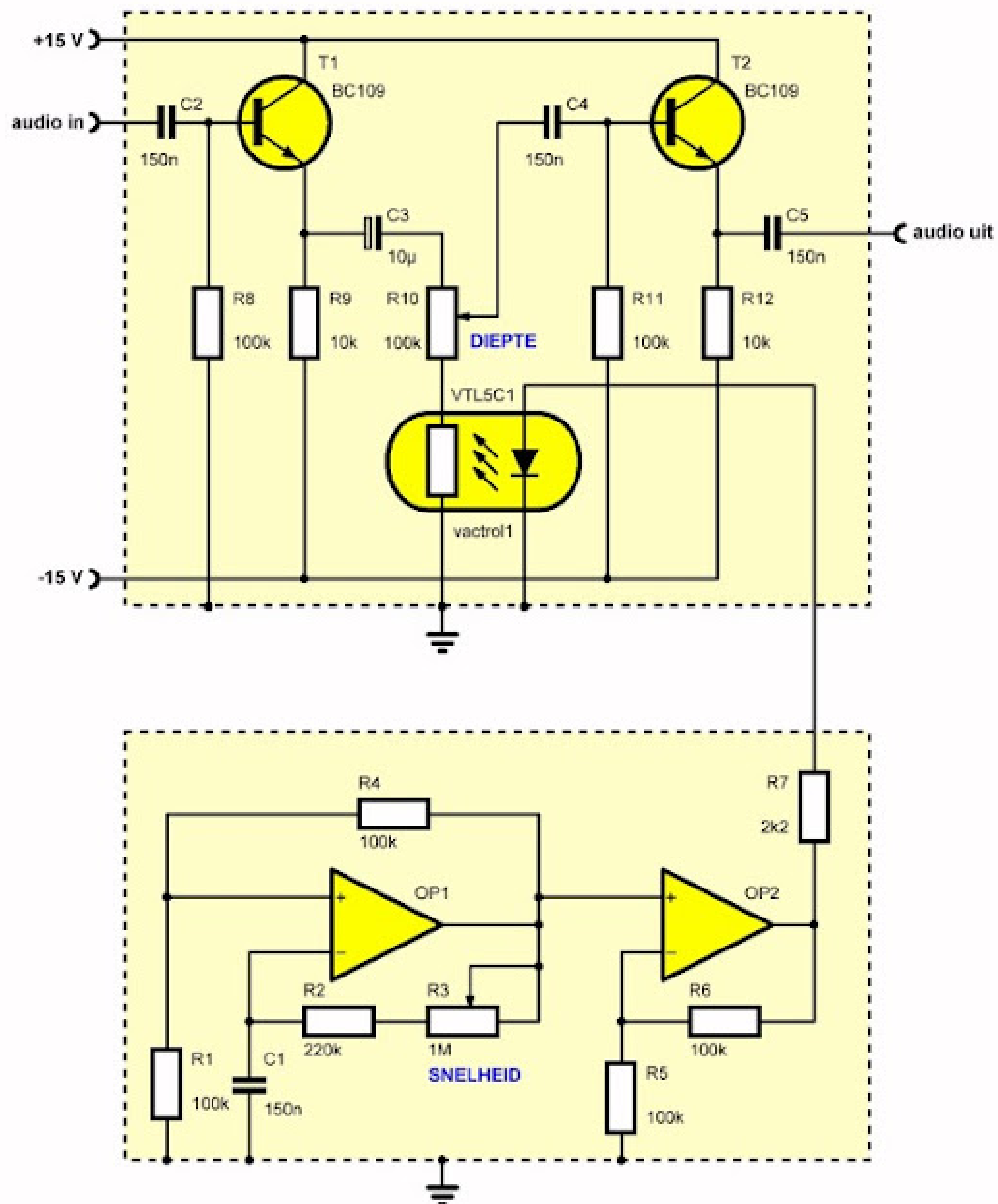
Een spanningsgestuurde verzwakker met twee vactrol's. (© 2018 Jos Verstraten)

Automatische versterkingsregeling
In onderstaande figuur wordt een automatische versterkingsregeling voorgesteld die in de vorige eeuw in het telefonienetwerk van de USSR werd toegepast. U kunt dit beproefde systeem nog steeds gebruiken om oversturing van audiosignalen te voorkomen. De werking is duidelijk. De LED in de vactrol wordt gevoed uit de gelijkgerichte uitgangsspanning van de versterker OP1. De traagheid van de LDR zorgt voor de noodzakelijke afvlakking van dit stuursignaal, een extra capacitieve afvlakking is niet noodzakelijk. Als dit signaal groter wordt zal de stroom door de LED toenemen en zal de weerstand van de vactrol dalen. Deze dalende weerstand beïnvloedt de versterkingsfactor van OP1.



Een eenvoudige VCA met een vactrol. (© 2018 Jos Verstraten)

Een vactrol tremolo
Tot slot geeft onderstaande figuur het schema van een tremolo met een vactrol. De oscillator is samengesteld rond OP1 en is klassiek van opbouw. De schakeling produceert een driehoeksgolf over de condensator C1. Dit signaal wordt versterkt en gebufferd met OP2 en naar de LED in de vactrol geleid. Het kan nodig zijn om de waarde van R7 te verlagen om ervoor te zorgen dat er genoeg stroom naar de LED wordt gestuurd om volledige modulatie van het signaal mogelijk te maken. Met de ingetekende waarden loopt frequentiebereik van ongeveer 2,5 Hz tot 14 Hz. Door het verhogen van de waarde van C1 kunt u de frequentie verlagen.
Het audiodeel van de schakeling, in de bovenste rechthoek getekend, is ook al klassiek van opbouw en bevat twee emittervolgers waartussen u de amplitudemodulatie door middel van de vactrol opneemt.



Waar het ooit allemaal mee begonnen is: een tremolo met een vactrol.
(© 2018 Jos Verstraten)